Aus dem Physikalischen Institut der Universität Würzburg
(Vorstand: Prof. Dr. Harms.)

Neubestimmung der Dielektrizitätskonstante von Benzol und von Aceton

INAUGURAL-DISSERTATION

verfaßt und der

Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Bayr. Julius-Maximilians-Universität Würzburg

zur Erlangung der Doktorwürde

am 8. VI. 37 vorgelegt von

Wilhelm Franz

aus Würzburg

1938

Werkbund-Druckerei, Würzburg

Berichterstatter:
Professor Dr. F. Harms.
Professor Dr. H. Ott.

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 1937.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Zweck der Arbeit.

Man braucht nur einen Blick in die Tabellen für Werte der Dielektrizitätskonstante (D.K.) zu werfen[1], um zu sehen, daß die Übereinstimmung der absoluten Werte keineswegs der wirklichen oder behaupteten Genauigkeit der Meßmethoden entspricht. Leicht ist der Vergleich zweier D.K., die nicht sehr verschieden voneinander sind.

Drude hat schon Benzol-Aceton- und Aceton-Wasserlösungen benutzt, um beliebige D.K. zwischen etwa 2 und 80 zur Verfügung zu haben.

Da andererseits viele Meßmethoden auf Vergleich der unbekannten Dielektrizitätskonstante (D.K.) mit einer bekannten beruhen, ist es wichtig, von wenigstens einigen Substanzen die Werte der D.K. genau zu kennen. Es wurde deshalb in vorliegender Arbeit der Versuch unternommen, von einigen solchen, als Eichflüssigkeiten geeigneten Substanzen, die D.K. mindestens auf einige Promille genau und wenn möglich, sowohl bei Niederfrequenz als auch bei Hochfrequenz zu messen.

Man wird bei solchen Vergleichsmessungen als Eichflüssigkeit wohl immer eine mit möglichst dem gleichen D.K.-Wert benutzen, den die zu untersuchende Substanz erwarten läßt. Deshalb wurde Benzol und Aceton zu den vorliegenden Messungen gewählt, da sich durch Mischungen geeigneter Konzentration damit alle Werte zwischen etwa 2.3 und 21 herstellen lassen. Benzol ist auch sonst für solche Zwecke unübertroffen, da es infolge seiner geringen Leitfähigkeit und seiner Dipollosigkeit die genauesten Werte erwarten läßt. Für höhere D.K.-Werte steht leider keine so günstige Substanz zur Verfügung, doch hält sich die Leitfähigkeit des verwendeten Acetons in solchen Grenzen, daß eine genaue Messung noch sehr gut möglich ist. Auch die Reinigung dieser beiden Substanzen ist mit einfachen Mitteln möglich; es genügt schon, wie wir weiter unten sehen werden, die käuflichen pro analysi Präparate zu trocknen, um einwandfreie, reproduzierbare Werte zu erhalten.

---

[1] In der Tabelle von Landolt-Börnstein sind selbst für das infolge seiner geringen Leitfähigkeit und seines einfachen Aufbaues verhältnismäßig leicht zu messende Benzol Werte zwischen 2.23 und 2.29 angegeben.

Prinzip der Methode.

Da alle Methoden zur Messung der D.K., mit Ausnahme der Fürth'schen Ellipsoidmethode[2], auf der Messung oder dem Vergleich der Kapazität eines Kondensators, einmal mit Luft, einmal mit der Substanz als Dielektrikum, beruhen, ist es nötig, erst eine Methode zur genauen Bestimmung dieser Kapazität zu finden. Da der Vergleich zweier Kondensatoren eine größere Genauigkeit erwarten läßt als eine absolute Messung der Kapazität, wurde sowohl bei der Niederfrequenz-, als auch bei der Hochfrequenzmessung versucht, damit auszukommen. Da andererseits die Genauigkeit, mit der dieser Vergleich möglich ist, in die D.K.-Werte eingeht, sind die Anforderungen an die Methode des Kapazitätsvergleichs sehr hoch.

Es wurde deshalb das ballistische Galvanometer dazu benutzt. Das Prinzip dieser Methode ist altbekannt. Man schickt den Ladestrom, der beim Anlegen einer Spannung an den Kondensator fließt, durch ein ballistisches Galvanometer. Wenn die angelegte Spannung konstant ist und auch sonst an der Anordnung nichts geändert wird, sind die Galvanometerausschläge den Kapazitäten direkt proportional.

An den Kondensator sind zur Durchführung der ballistischen Messung folgende Forderungen zu stellen:

a) Da, bei der hohen Empfindlichkeit des Galvanometers und der hohen angelegten Ladespannung kein Isoliermaterial zur Vermeidung von Kriechströmen ausreicht, wurde der Meßkondensator als Schutzringkondensator konstruiert. Die Distanzstücke, gleichzeitig die einzigen Isolatoren am Kondensator, wurden durch leitende Zwischenstücke, die mit der Erde verbunden wurden, unterbrochen, sodaß die kleinen Restströme, die durch die mangelnde Isolation hervorgerufen wurden, nicht ins Galvanometer gelangen konnten, sondern direkt zur Erde abflossen (Abb. 1).

b) Der Kondensator darf nicht zu klein sein, damit möglichst große Ausschläge am Galvanometer erreicht werden. Bei

---

[2] R. Fürth, Z. S. f. Phys. 22, 98, 1924.

dem benutzten Galvanometer und der angelegten Ladespannung von 300 Volt ergab sich eine Kapazität von etwa 50 bis 100 cm als ausreichend.

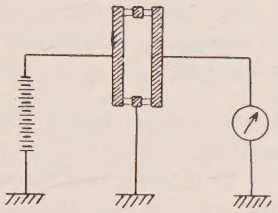

Abb. 1.

c) Die Distanzstücke müssen gut isolieren und dürfen vor allem keine Feuchtigkeit adsorbieren, da sonst durch elektrolytische Spannungen zwischen der mit dem Galvanometer verbundenen Platte und den Zwischenstücken ein unsicherer Nullpunkt des Galvanometers hervorgerufen wird. Deshalb müssen auch diese Zwischenstücke und die Platten selbst aus dem gleichen Metall sein. Kleine Quarzwürfel haben sich als Isolatoren für die Kondensatorplatten bewährt.

d) Der ganze Kondensator muß staubdicht eingebaut werden, da schon die kleinsten Staubteilchen durch die angelegte Spannung eine Brücke zwischen den Platten bilden und die Messungen stören würden.

Außer diesen, für die ballistische Messung nötigen Forderungen soll der Kondensator für die Bestimmung der D.K. noch folgenden Ansprüchen genügen:

e) Die Platten, überhaupt alle Metallteile, die mit der Substanz in Berührung kommen, müssen aus einem Material bestehen, das von den zu untersuchenden Substanzen nicht angegriffen wird. Die Metallteile wurden deshalb alle aus Messing angefertigt, poliert und dann elektrolytisch vergoldet. Proben mit Salzsäure zeigten, daß der Überzug vollkommen gleichmäßig und dicht war, sodaß nur Gold mit der Substanz in Berührung kam und die darunter liegenden Metallteile so vor dem Angriff geschützt waren. Auch das zu den Distanzstücken benutzte Isoliermaterial muß der Forderung genügen, die Substanzen nicht zu verunreinigen. Das verwendete Quarzglas erfüllt diese Bedingung in hohem Grade.

f) Der Luftspalt zwischen den Platten darf nicht zu klein werden, damit sich keine Luftblasen festhängen können. Aus dem gleichen Grunde soll der Kondensator so eingebaut werden, daß der Luftspalt vertikal steht. Weiter ist es ein großer Vorteil, wenn man den Raum zwischen den Platten beobachten kann, um ganz sicher zu sein, daß keine Luftblasen die Resultate fälschen können.

Es soll hier gleich eine Beschreibung des Kondensators erfolgen, wie er zu den Messungen benutzt wurde (Abb. 2). In Hinblick auf die Forderung f) wurde der Kondensator als Plattenkondensator gebaut mit zwei miteinander verbundenen Außenplatten und einer Mittelplatte. Um die nötige Stabilität zu erreichen, wurden die Platten sehr dick gemacht. Die beiden Außenplatten hatten einen kräftigen Rand für die Auflage der Isolationsstützen und für die drei Schrauben, die das ganze Paket zusammenpreßten. Entsprechend den drei, um je 120° gegeneinander versetzten Quarzstützen trug die Mittelplatte, die sonst vollkommen plan und ohne Durchbohrung war, drei Ansätze. Die Isolationsstützen bestanden aus je zwei quadratischen Quarzstückchen von 6 mm Kantenlänge, zwischen denen sich ein rundes Messingscheibchen von 5 mm Durchmesser und etwa 1,4 mm Dicke mit einem eingeschraubten Messingdraht als Ableitung befand. Diese sechs Drähte waren außerhalb der Flüssigkeit zusammengefaßt und mit Erde verbunden. Wie schon erwähnt, waren alle Metallteile vergoldet. Durch verschieden dicke Quarzstückchen konnte der Plattenabstand und damit die Kapazität des Kondensators geändert werden. Für die Benzolmessung betrug sie etwa 80 cm; für die Acetonmessung mußte sie auf etwa 25—30 cm verkleinert werden, um mit den beiden Drehkondensatoren den Zuwachs an Kapazität, den das Aceton verursachte, noch ausgleichen zu können.

Der ganze Kondensator stand, mit den beiden Zapfen an den Außenplatten auf einem kleinen Hocker aus einem gebogenen Glasstab ruhend, aufrecht in einem Leyboldtrog mit den Abmessungen $5 \cdot 11{,}5 \cdot 12$ cm. Zur Füllung waren etwa 500 cm^3 Flüssigkeit nötig. Eine Glasglocke schützte den ganzen Kondensator vor Staub.

Als Grundplatte diente eine 10 mm dicke runde Spiegelglasscheibe mit sechs Durchbohrungen. Drei davon vermittelten die Zuleitungen zu den beiden Plattensätzen und zu den geerdeten Metallscheibchen zwischen den Quarzstücken. Die Zuleitung zu

der mittleren Platte war dabei, um ein Überkriechen von Ladungen bei der ballistischen Messung zu vermeiden, aus einem Messingrohr mit zentral durchgeführtem Messingstab gebildet. Das Messingrohr wurde geerdet. Die Isolation besorgte auch hier ein Quarzröhrchen. In eine weitere Durchbohrung der Glasscheibe war ein Glasrohr mit Schliff eingekittet, das mittels eines aufgesetzten Hebers zur Füllung und Entleerung des Kondensatortroges diente. Zu diesem Zweck war in die fünfte Durchbohrung ein Glasrohr mit Hahn gekittet, durch das ein Unterdruck unter der Glocke erzeugt werden konnte. Um die letzten Reste der

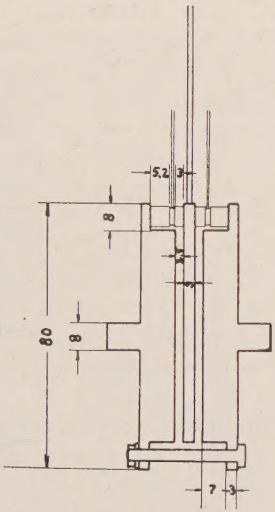

Abb. 2.

Flüssigkeit nach einer Füllung zu verdampfen, konnte die Glasglocke durch dieses Rohr ausgepumpt werden. Die letzte Durchbohrung der Spiegelglasscheibe diente als Reserve und war durch ein eingekittetes, zugeschmolzenes Glasrohr verschlossen. Auch ohne Benutzung eines Dichtungsmittels (z. B. Hahnfett) war die Anordnung so dicht, daß es nach dem Evakuieren erst nach einigen Stunden möglich war, die Glocke abzuheben. Sämtliche Durchführungen durch die Spiegelglasscheibe wurden mit einem Kitt, bestehend aus feinst gepulverter Magnesia und Wasserglas, befestigt. Dieser Kitt haftet auch auf Glas sehr gut und

wird im Verlauf einiger Stunden steinhart. Er wurde außerdem von den verwendeten Substanzen nicht angegriffen.

Die Spiegelglasplatte ruhte auf einem kleinen Tischchen, dessen Platte einen runden Ausschnitt von etwas kleinerem Durchmesser als die Spiegelglasscheibe selbst besitzt, hatte, sodaß die Durchführungen unten frei herausführten.

An diesem Tischchen angebaut und durch Glasröhren mit Schliffverbindungen mit dem Kondensatortrog verbunden, war die Vorratsflasche für die zu messende Substanz. Um auch Temperaturkoeffizienten zu messen, muß die Substanz in dieser Flasche abgekühlt, bzw. erwärmt werden können. Die Vorratsflasche stand deshalb in einer Glasschale mit etwas größerem Durchmesser; der Zwischenraum wurde dann mit warmem, bzw. mit gekühltem Wasser gefüllt. Die beigefügten Abbildungen (Abb. 3, 4, 5) zeigen die Konstruktion des Kondensators, die Anordnung der Durchführungen und den Zusammenbau mit der Vorratsflasche. Ein zweiter Schliff an der Vorratsflasche trug ein, durch einen Hahn abzusperrendes, Trockengefäß, das den Druckausgleich mit der Außenluft ermöglichte. Bei den Benzolmessungen war dieses Trockengefäß mit Phosphorpentoxyd, bei den Acetonmessungen mit Chlorkalzium gefüllt. An Stelle dieses Trockengefäßes konnte ein Destillierapparat, bestehend aus Glaskolben mit angeblasenem Kühler, gesetzt werden, sodaß die Substanzen direkt in die Vorratsflasche destilliert werden konnten.

Das Prinzip der Methode besteht nur darin, diesen Plattenkondensator mit einem Drehkondensator parallel zu schalten und die Zunahme an Kapazität, die der Plattenkondensator durch die Füllung mit dem Dielektrikum erfährt, durch Verkleinerung des Drehkondensators auszugleichen, sodaß die Gesamtkapazität des Systems dieselbe bleibt. Der Drehkondensator trägt eine Skala mit verstellbaren Anschlägen, durch die die Kapazitätsänderung eingestellt werden kann. Da nun die ballistische Ausmessung der Kapazität des Plattenkondensators und der Kapazitätsdifferenz des Drehkondensators mit demselben Galvanometer und mit gleicher Ladespannung erfolgt, so sind die Kapazitätswerte dem Galvanometerausschlag proportional[3].

[3] Die Bestimmung der Kapazitätsdifferenz für zwei Stellungen des Drehkondensators ist auf diesem Wege sehr viel genauer ausführbar als es bei einer Eichung des Drehkondensators in der gewöhnlichen Art möglich wäre.

Es gilt also die Beziehung:

$$\frac{\text{Kapazitätsdifferenz am Drehkondensator (in Skalenteilen)}}{\text{Kapazität des Plattenkondensators mit Luftfüllung (in Skalenteilen)}} = \varepsilon - 1$$

d. h. die Dielektrizitätskonstantenmessung läuft auf einen einfachen Vergleich zweier Galvanometerausschläge hinaus.

Die Ausmessung des Drehkondensators wurde dabei so vorgenommen, daß die Ladespannung dauernd am Kondensator lag

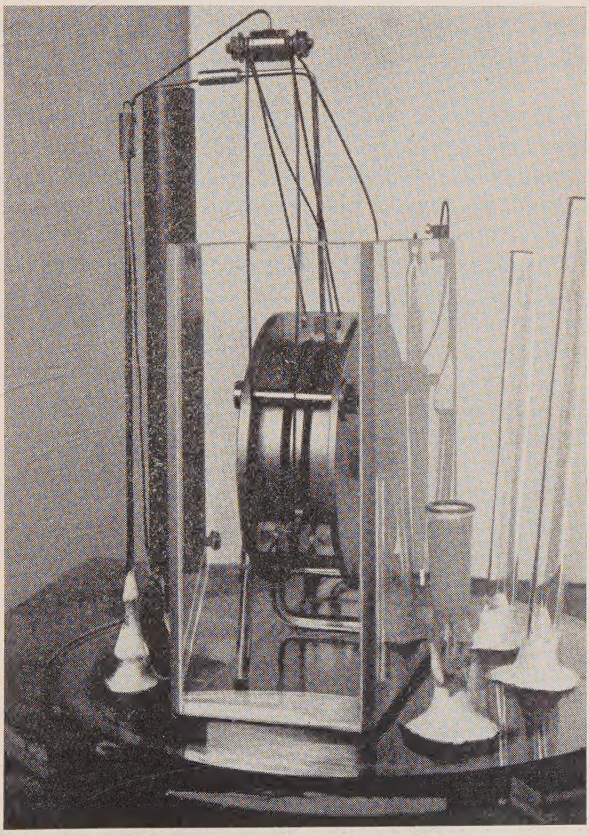

Abb. 3

und nur durch schnelles Vergrößern bzw. Verkleinern der Kapazität von einem Anschlag zum anderen Stromimpulse durch das Galvanometer geschickt wurden. Wenn sich das Galvanometer während der Dauer der Kapazitätsvergrößerung bzw. Verkleinerung noch nicht merklich in Bewegung gesetzt hat, so ist es dasselbe wie wenn eine Kapazität mit einem Schalter zu- bzw. abgeschaltet würde. Da das verwendete Galvanometer eine Schwingungsdauer von 16 sec für eine halbe Periode hatte und die Verstellung am Drehkondensator von einem Anschlag zum anderen nur Bruchteile einer Sekunde dauerte, war auch dieser Forderung genügt. Durch dieses Verfahren, die Spannung dauernd am Drehkondensator liegen zu lassen, war auch der Einfluß, den die Leitung zur Zuführung der Ladespannung zum Drehkondensator auf die von da zum Galvanometer führende hatte, ausgeschaltet. Die Versuche zeigten, daß hier jede Abschirmung unnötig war.

Um die ballistische Ausmessung zu ermöglichen, mußte der Drehkondensator genau wie der Plattenkondensator in Schutzringbauart ausgeführt sein. Die dort angeführten Punkte a bis d gelten auch hier. Es mußte also ebenfalls die Isolation zwischen den beiden Plattensätzen durch geerdete Metallstücke unterbrochen sein und der ganze Kondensator mußte zum Schutz gegen Staub und besonders um die durch Nähern und Entfernen des Bedienenden hervorgerufenen Schwankungen der Erdkapazität unschädlich zu machen, vollständig in Metall gekapselt sein.

Der Drehkondensator war aus zwei guten Rundfunkkondensatoren gefertigt, deren Isolation wie oben angegeben, geändert wurde. Die beiden Kondensatoren waren auf einer Achse und wurden so zusammen bewegt. Die maximale Kapazität betrug 250 und 500 cm. Der drehbare Plattensatz beider Kondensatoren war durch die gemeinsame Achse miteinander verbunden und an eine isoliert in das Gehäuse eingesetzte Klemme geführt. Die anderen Plattensätze waren einzeln herausgeführt, sodaß jeder Kondensator allein oder beide parallel geschaltet verwendet werden konnte. Zur Abschirmung waren die Drehkondensatoren in einem großen, zylindrischen Topf mit Boden und Deckelplatte eingebaut. Letztere diente gleichzeitig als Skala und besaß zwei verstellbare Anschläge für den als Zeiger dienenden Hebel. Im Verlauf der Versuche hat sich ergeben, daß die Abstimmung sehr scharf und deshalb schwer einzustellen ist. Es wurde deshalb auf den beiden Anschlägen noch je eine festklemmbare

Abb. 4

Abb. 5

Schraube zur Feineinstellung angebracht. Die Metallstücke zwischen dem Isoliermaterial der Kondensatoren waren innen mit dem Gehäuse verbunden.

Bei der ballistischen Ausmessung der Kapazitätsdifferenz werden nur die Kraftlinien erfaßt, die zwischen den Plattensätzen übergehen. Es darf deshalb bei der Einstellung dieser Kapazitätsdifferenz in der Meßbrücke oder im Hochfrequenzkreis die Zunahme an Kapazität, die der Plattenkondensator durch Einfüllung des Dielektrikums erfährt, nur ausgeglichen werden durch Wegnahme von ebensoviel Kapazität der beiden Plattensätze des Drehkondensators gegeneinander. Die Kapazität der Plattensätze gegen das Gehäuse muß konstant sein. Das ist nun beim drehbaren Plattensatz im allgemeinen nicht der Fall, denn je nach dessen Einstellung hat er einen größeren oder kleineren Abstand vom Gehäuse. Um diesen Fehler zu vermeiden, wurde in dem Drehkondensator noch eine innere Abschirmung angebracht, bestehend aus einem, aus dünnem Kupferblech gebogenen halbzylindrischen Gehäuse, in das sich der drehbare Plattensatz beim Verstellen hineindrehte. Diese Abschirmung war mit dem drehbaren Plattensatz verbunden. Die Kapazität beider Plattensätze gegen das Gehäuse war nun in jeder Stellung des Drehkondensators konstant.

Auf dem Boden des Abschirmgehäuses stand noch eine flache Schale mit Phosphorpentoxyd, um die Luft im Kondensator trocken zu halten.

Abb. 6 zeigt das Schaltbild der Einrichtung zur ballistischen Ausmessung der Kondensatoren. Wie schon früher beschrieben, ist es nicht notwendig, den genauen Wert der Ladespannung zu kennen; es genügt vielmehr die Spannung während einer Meßreihe konstant zu halten. Zu diesem Zweck wurde die bekannte Kompensationsanordnung mit einem Normalelement benutzt. Die Ladespannung E lag zunächst an einem Polwechsler S_1. Von diesem aus war der Stromkreis über R_V, R_1 und R_2 geschlossen. R_V war ein regelbarer Widerstand von etwa 1500 Ω. Der Widerstand R_1 war aus Manganindraht auf einem Glasrohr von etwa 6 cm Durchmesser und 150 cm Länge gewickelt. Sein Gesamtwert betrug rund 60 000 Ω; in der Mitte hatte er eine Anzapfung. Um die nötige Konstanz zu gewährleisten, wurde dieser Widerstand durch wiederholte hohe Belastung gealtert. R_2 war ein Präzisionsstöpselwiderstand. Zur Kompensation wurde ein Weston-Normalelement benutzt, das über einen Polwechsler S_2 an dem Widerstand R_2 lag. In diesem Stromkreis war noch zur

Nullanzeige ein Spiegelgalvanometer und zwei Schalter S_3 und S_4, davon einer mit einem 100 000 Ω-Widerstand überbrückt, eingeschaltet. Die beiden Polwechsler S_1 und S_2 waren mechanisch miteinander gekuppelt, sodaß nur immer beide gleichzeitig umgelegt werden konnten; außerdem war diese Kupplung so vorgenommen, daß immer erst S_1 und dann erst S_2 geschlossen wurde. Es war auf diese Weise ein Kurzschluß des Normalelements über R_2 unmöglich. Die ganze Kompensationseinrichtung war einpolig geerdet und alle Widerstände und Schalter standen zur Vermeidung von Kriechströmen auf geerdeten Blechen.

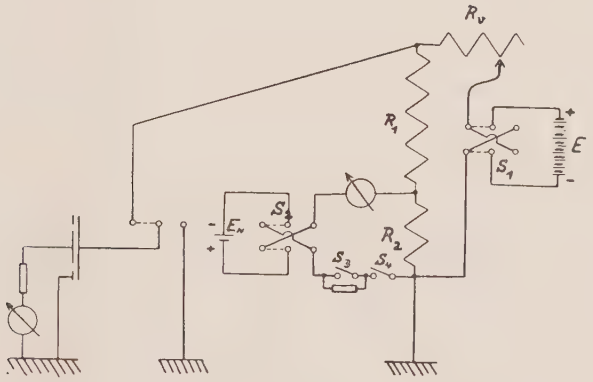

Abb. 6.

Bei der Messung wurde zunächst R_V auf seinen maximalen Wert gestellt, dann durch Veränderung von R_2 und vorsichtige Betätigung des Schalters S_4 der Kompensationskreis stromlos gemacht. Nach ungefähr richtiger Einstellung konnte S_3 geschlossen und an R_2 noch genau nachreguliert werden. An diesem Widerstand wurde dann im weiteren Verlauf der Messung nichts mehr geändert. Die durch Belastung mit den Widerständen R_V, R_1 und R_2 herorgerufene allmähliche Abnahme der Spannung der Batterie E wurde durch Verkleinerung von R_V kompensiert. Am Widerstand R_1 und R_2 lag nun, solange das Galvanometer im Kompensationskreis keinen Strom anzeigt, eine konstante Spannung, die als Ladespannung benutzt wurde. Sie wurde über einen einpoligen Umschalter an den zu messenden Kondensator geführt. Die zweite Platte des Kondensators wurde

über einen Schutzwiderstand von 1 M Ω mit dem Galvanometer, das den Lade- bzw. den Entladestrom anzeigte, verbunden. Der andere Pol des Galvanometers wurde geerdet. Als Galvanometer hat sich Type Nr. 159 von Hartmann & Braun mit einer Empfindlichkeit von $0{,}7 \cdot 10^{-10}$ Amp und 16 sec Schwingungsdauer für eine halbe Periode bewährt. Durch seinen sehr sicheren Nullpunkt und durch seine große Schwingungsdauer war es für diesen Zweck sehr gut geeignet. Abgelesen wurde es mit einem Fernrohr; der Skalenabstand betrug etwa 250 cm. Alle Ausschläge wurden auf Bogen reduziert. Das Spiegelgalvanometer im Kompensationskreis besaß eine einfache Lichtzeigerablesung.

Durch systematische Versuche wurde festgestellt, wie weit die Zuleitungskapazitäten in die ballistischen Galvanometermessungen eingehen. Solange sich die Spannung auf den Leitungen nicht ändert, das war bis zum Umschalter der Fall, ist keine Beeinflussung möglich. Erst das Leitungsstück vom Umschalter zur Kondensatorplatte, das ja mit aufgeladen bzw. entladen wurde, kann Fehler verursachen. Diese Zuführung wurde deshalb in ein Glasrohr mit geerdeter Abschirmung verlegt. Auch die Zuführung innerhalb der Glasglocke wurde noch durch ein übergeschobenes, geerdetes Metallrohr in die Abschirmung einbezogen. Eine Probe durch Aufladen und Entladen der Zuführung allein mit abgeklemmtem Kondensator ergab so, nach Durchführung dieser Abschirmung keinerlei Ausschlag des Galvanometers mehr, sodaß also die gemessenen Galvanometerausschläge nur von Kraftlinien, die zwischen den Kondensatorplatten übergehen, herrühren. Bei der Ausmessung des Drehkondensators sind die Zuleitungen ganz ohne Einfluß, da ja die Spannung dauernd am Kondensator liegt und die Stromimpulse nur durch Vergrößern, bzw. Verkleinern der Kapazität bewirkt werden. Eine Abschirmung der Zuleitungen ist hier also unnötig.

Da die Galvanometerausschläge der Ladespannung direkt proportional sind, ist die Genauigkeit, mit der die Spannung konstant gehalten werden kann, von großer Wichtigkeit. Für die Messung mit Benzol betrug die Spannung E = 300 Volt. R_1 war 60 000 Ω, R_2 ergab sich somit zu etwa 200 Ω. Eine Änderung von R_2 um 0,1 Ω ergab am Kompensationsgalvanometer einen Ausschlag von etwa 10 cm. Wurde nun die Nullpunktseinstellung dieses Galvanometers auf 1 cm genau vorgenommen, was sehr leicht durchführbar war, so entsprach das einer Änderung von R_2 von etwa 0,01 Ω, d. h. $\frac{1}{20\,000}$ des Gesamtwiderstandes. Die

Ladespannung wurde also auf $\frac{1}{20}$ Promille konstant gehalten, das ist weit mehr als für die Messung nötig.

Die Spannung wurde von einer Batterie aus kleinen Akkumulatorenzellen geliefert, die bei der geringen Belastung von etwa 5 m Amp lange Zeit ihre Spannung hielten. Durch R_V konnte eine allmähliche Spannungsabnahme von $\frac{1500}{60\,000} = \frac{1}{40}$ der Gesamtspannung = 7.5 Volt ausgeglichen werden.

Anordnung zur D.K.-Messung von Benzol.

a) Mit Niederfrequenz.

Zur D.K.-Messung von Benzol mit Niederfrequenz wurde eine Wheatstone'sche Brücke mit einem Hilfszweig nach Wagner[4] zur Symmetrierung der Spannungsquelle gegen Erde benutzt. Abb. 7 zeigt das Schaltbild der Anordnung. Die Niederfrequenzspannung lieferte ein Stimmgabelsummer, dessen Schwingungen von einem dreistufigen Verstärker aufrechterhalten wurden. Um akustische Störungen zu vermeiden, war er in einem anderen Raum aufgestellt. Die Brücke selbst war ganz mit Kondensatoren aufgebaut. Zweig d war der Meßkondensator mit parallel geschaltetem Drehkondensator. Zu Zweig c und d waren zwei Flüssigkeitswiderstände w_1 und w_2 parallel geschaltet, die zum Ausgleich der sehr geringen Leitfähigkeit des Benzols dienten. Sie waren mit destilliertem Wasser gefüllt. Der Widerstand w_1 wurde bei der Messung wiederum nicht verändert; das durch die Leitfähigkeit des Benzols im Plattenkondensator gestörte Gleichgewicht der Brücke wurde durch Vergrößern von w_2 ausgeglichen. Auch die Kondensatoren a, b, c, e und f wurden, wie schon früher bei Beschreibung des Meßprinzips erwähnt, bei der Messung nicht geändert. Zur Nullpunkteinstellung diente ein Telefonhörer, der über einen Transformator und einen zweistufigen Verstärker an die Brücke angeschaltet war. Das Übersetzungsverhältnis der Brücke war etwa 1 : 1; d. h. die Kondensatoren hat-

[4] Kohlrausch: Praktische Physik.

ten alle ungefähr die Kapazität des Plattenkondensators + parallel geschaltetem Drehkondensator in seiner Maximalstellung.

Es ist nun noch zu überlegen, wie die geerdeten metallischen Zwischenstücke der Isolierung sowohl des Plattenkondensators als auch des Drehkondensators zu schalten sind. Man geht dabei von der ballistischen Ausmessung der Kondensatoren aus, denn nur die Kapazitätsbeträge, die bei der ballistischen Messung mitgemessen werden, dürfen auch bei dem Brückenabgleich mit und ohne Benzolfüllung in die Messung eingehen. Beim Plattenkondensator werden bei der ballistischen Messung nur die Kraftlinien erfaßt, die zwischen den beiden Plattensätzen übergehen. Die Kraftlinien zwischen der aufgeladenen Platte und den Di-

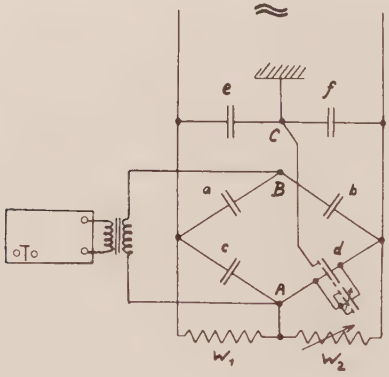

Abb. 7.

stanzstückchen tragen nichts zum Galvanometerausschlag bei, da ja die Distanzstücke unter Umgehung des Galvanometers direkt mit Erde verbunden sind. Es darf also bei der Brückenmessung der Kapazitätsbetrag der beiden äußeren Platten gegen die Distanzstückchen, der sich bei der Füllung mit Benzol ja ebenfalls ändert, nicht mit in den Abgleich eingehen. Die Distanzstückchen des Plattenkondensators werden deshalb direkt mit dem geerdeten Punkt C verbunden. Die Änderung dieser Kapazität durch die Benzolfüllung bewirkt so nur eine kleine Vergrößerung des Kondensators f und somit nur eine kleine Verschiebung der Symmetrie der Brücke gegen Erde, die ohne jeden Einfluß ist.

Bei dem Drehkondensator sind die metallischen Zwischenstücke der Isolierung der beiden Plattensätze mit dem Gehäuse verbunden. Durch die schon bei Beschreibung des Drehkondensators erwähnte innere Abschirmung ist ihre Kapazität gegen den drehbaren Plattensatz bei jedem Drehwinkel konstant, sie sind also in die innere Abschirmung mit einbezogen. Bei der ballistischen Ausmessung des Drehkondensators werden wiederum nur die Kraftlinien erfaßt, die zwischen den beiden Plattensätzen übergehen, da ja das Gehäuse direkt mit Erde verbunden ist. Da in der Brücke am Drehkondensator nur die Kapazitätsänderung, die die Benzolfüllung des Plattenkondensators verursacht, abgeglichen wird, kann das Gehäuse und damit die Zwischenstücke mit dem festen Plattensatz verbunden werden. Die Kapazität des drehbaren Plattensatzes gegen Gehäuse und den damit verbundenen Metallstückchen wirkt so nur wie eine parallel geschaltete konstante Kapazität. Es können also durch diese Kapazität keinerlei Meßfehler hervorgerufen werden.

b) Mit Hochfrequenz.

Zur D.K.-Messung mit Hochfrequenz wurde der Plattenkondensator mit dem parallel geschalteten Drehkondensator in einen Resonanzkreis gelegt, der durch einen kleinen Sender erregt wurde und dessen Einstellung durch eine angekoppelte Spule mit Gleichrichter und Galvanometer kontrolliert wurde. Abb. 8 zeigt das Schaltbild. A war ein kleiner, mit einer Empfangsröhre betriebener Sender mit Quarzkristallsteuerung in der von Cady angegebenen Schaltung. Die Heiz- und Anodenspannungen wurden, um auch die Amplitude der abgegebenen Hochfrequenzspannung konstant zu halten, aus Akkumulatoren entnommen. Der Kristall war nur sehr wenig belastet, sodaß auch ohne Temperaturkontrolle desselben die Frequenz des Senders hinreichend konstant war. Für die Messung wurden drei Kristalle mit den Frequenzen

100.00 K.Hz.
305.95 K.Hz.
1008.78 K.Hz. verwendet.

Der Resonanzkreis B bestand aus dem parallel geschalteten Platten- und Drehkondensator und aus drei Selbstinduktionsspulen. Die Spulen a und c dienten zur Ankopplung an den Sender bzw. an das Resonanzanzeigeinstrument und besaßen nur

einige wenige Windungen je nach der verwendeten Wellenlänge, sodaß also die Ankopplung sehr lose war. Den Hauptteil der Selbstinduktion, die nötig war, um den Kreis auf Resonanz zu bringen, hatte die Spule b, die weit ab vom Sender stand, um direkte Kopplung und Energieaufnahme aus diesem zu vermeiden. Ihre Spulenachse stand außerdem noch senkrecht zu der des Senders. Zur Resonanzanzeige war an Spule c eine weitere Spule angekoppelt, die ihre Spannung an ein Röhrenvoltmeter mit Galvanometer abgab. Das Röhrenvoltmeter besaß eine Hochfrequenzpenthode. Der Anodenruhestrom konnte kompensiert werden, sodaß es möglich war, ein ziemlich hoch empfindliches Instrument zur Anzeige zu verwenden. Betrieben wurde das Röhrenvoltmeter aus dem Wechselstromnetz, die Anodenspannung war durch eine Glimmröhre stabilisiert. Die Schirmgitter- und die Gittervorspannung konnte mittels Potentiometer eingestellt werden, sodaß es möglich war, genau im quadratischen Teil der Kennlinie der Röhre, also mit größter Empfindlichkeit zu arbeiten. Da das Röhrenvoltmeter nur zur Anzeige der Resonanz diente, wurde eine genaue Eichung unterlassen; die Empfindlichkeit dürfte etwa einige Millivolt pro Skalenteil betragen haben.

Nun noch einige Bemerkungen zur Schaltung der metallischen Zwischenstücke der Isolierung der Kondensatoren bei der Hochfrequenzmessung. Abb. 8 zeigt, wie sie bei den Messungen geschaltet waren. Die Überlegung, die wir weiter oben bei der Besprechung der Brückenschaltung angestellt haben, sagte aber, daß auf diese Weise Meßfehler entstehen; denn der Kapazitätsbetrag der beiden äußeren Platten des Meßkondensators gegen die Zwischenstücke, der hier der eigentlichen Kondensatorkapazität parallel geschaltet ist, vergrößert sich ja ebenfalls bei der Benzolfüllung um das ε-fache. Bei der ballistischen Messung wird dieser Kapazitätsbetrag jedoch nicht miterfaßt. Leider besteht hier bei der Hochfrequenzmessung keine Möglichkeit, durch entsprechende Schaltung diese Kapazität unschädlich zu machen. Es wurde deshalb zu dem Ausweg gegriffen, diese fehlerhafte Schaltung auch einmal bei den Niederfrequenzmessungen in der Brücke zu verwirklichen und damit eine D.K.-Messung von Benzol zu machen. Die (kleine) Differenz der D.K.-Werte, die diese fehlerhafte Schaltung gegen die als richtig vorher angegebene Brückenschaltung ergab, wurde als konstanter Fehler von den Werten der Hochfrequenzmessungen abgezogen. Die Überlegung über die Schaltung der Zwischenstücke bei dem

Drehkondensator, die weiter oben angestellt wurden, gelten auch hier in vollem Umfang.

Es soll hier gleich von Versuchen gesprochen werden, die angestellt wurden, um die Meßgenauigkeit der Anordnung zu prüfen. Die Versuche wurden im Hochfrequenzresonanzkreis vorgenommen, aber da sie sich auf das System Meßkondensator + parallel geschalteter Drehkondensator beziehen, gelten sie auch für die Niederfrequenzmessungen, denn die beiden Kondensatoren werden ja immer parallel geschaltet verwendet. Die Messungen wurden vor allem auch gemacht, um die Wirkung der schon

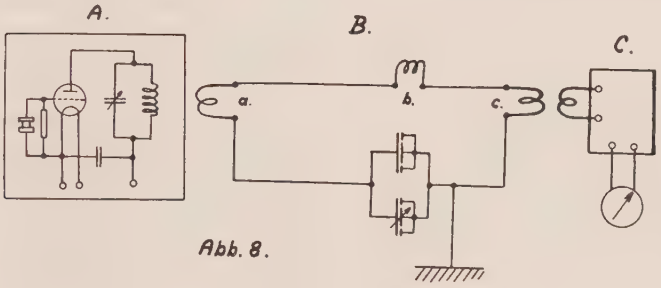

Abb. 8.

erwähnten inneren Abschirmung im Gehäuse des Drehkondensators zu kontrollieren. Für die Benzolmessungen wurde der Plattenkondensator mit den dünneren Distanzstückchen benutzt, seine Kapazität betrug dann rund 80 cm, mit Benzolfüllung also rund 200 cm. Für den Abgleich der Kapazitätszunahme des Plattenkondensators bei der Füllung mit Benzol wurde der 250 cm Drehkondensator benutzt, um möglichst die ganze Skala für die Einstellung auszunutzen und so eine größere Genauigkeit zu erreichen. Zu diesen Kontrollmessungen wurde nun auch der 500 cm Kondensator herangezogen. Außerdem wurden Messungen gemacht, bei denen zu dem Kondensatorsystem Plattenkondensator + Drehkondensator noch ein dritter fester Kondensator parallel geschaltet wurde, denn eine konstante Kapazität darf nach den Überlegungen an den Resultaten nichts ändern. Diese Messungen wurden mit allen drei Frequenzen vorgenommen. Während die Weite vor Herstellung der inneren Abschirmung im Drehkondensator noch innerhalb $6^0/_{00}$ des Gesamtwertes der D.K. schwankten, lagen die Streuungen nach deren Anbringung

nur noch innerhalb $1^0/_{00}$, sowohl mit 250, als auch mit 500 cm Drehkondensator mit und ohne Parallelkapazität gemessen.

Um die Frequenzabhängigkeit der Brücke zu prüfen, wurde der Plattenkondensator durch zwei feste einstellbare Kondensatoren ersetzt, von denen einer parallel zum Drehkondensator lag und etwa die Kapazität des leeren Plattenkondensators hatte, während der zweite durch einen Schalter zugeschaltet werden konnte und seine Kapazität etwa dem Zuwachs, den das Benzol im Plattenkondensator ergeben würde, entsprach. Dieser Zusatzkondensator wurde dann am Drehkondensator wieder abgeglichen und die eingestellte Differenz ballistisch ausgemessen. Diese Messungen wurden mit der kleinsten und der größten verwendeten Frequenz ausgeführt. Leider sind dieser Messungen schon gemacht worden, als der Drehkondensator noch nicht mit der inneren Abschirmung versehen war. Die erhaltenen Werte zeigten zwischen 100.00 K.Hz. und 1008.78 K.Hz. einen Unterschied, der einer D.K.-Differenz von $6^0/_{00}$ entsprechen würde. Da die eingestellten Kapazitätsdifferenzen auf verschiedenen Skalenstücken des Drehkondensators lagen und wie schon früher angegeben, vor Durchführung der inneren Abschirmung die Kapazität des drehbaren Plattensatzes gegen Gehäuse bei verschiedenen Stellungen desselben nicht konstant war, ist als sicher anzunehmen, daß dieser Fehler durch die eben erwähnte Unkonstanz der Kapazität bedingt ist. Eine Messung nach Durchführung dieser inneren Abschirmung hätte sicher diesen Frequenzfehler auch innerhalb $1—2^0/_{00}$ ergeben.

Noch einige Bemerkungen zur Durchführung der Messungen. Für die Benzolmessung wurde der Plattenkondensator mit den dünneren Quarzisolationsstückchen versehen, sodaß seine Luftkapazität etwa 80 cm betrug. Dementsprechend wurde zum Abgleich der 250 cm Drehkondensator benutzt. Der Drehkondensator wurde nun fast auf seinen Maximalwert und alle anderen Kondensatoren der Meßbrücke ungefähr auf den Wert Plattenkondensator + Drehkondensator eingestellt. Der Abgleich der Brücke geschah zunächst so, daß der Transformator zum Verstärker und Telefon zuerst an Punkt B und C geschaltet und mit den Kondensatoren e und f auf Tonminimum eingestellt wurde. Dann wurde der Transformator mit A und B verbunden. Bei Berührung des Punktes A der Brücke (Gehäuse des Drehkondensators) zeigte sich nun noch meist eine kleine Verschiebung des Minimums am Drehkondensator, die von der noch nicht ganz genauen Symmetrierung gegen Erde herrührt. Durch Ver-

stellen von e oder f läßt sich erreichen, daß das Minimum am Drehkondensator auch bei Berührung des Gehäuses an derselben Skalenstelle bleibt. Die Einstellung der Symmetriekondensatoren ist dabei sehr scharf, viel schärfer als bei der Einstellung des Hilfszweiges nach Tonminimum im Kopfhörer. Der Drehkondensator wird nun genau eingestellt und die Einstellung durch einen der Anschläge an der Skala fixiert. Durch Erzeugung eines Unterdruckes unter der Glocke wird nun das Benzol aus der Vorratsflasche in den Kondensatortrog gefüllt und am Drehkondensator und Widerstand w_2 das Tonminimum wieder eingestellt und mit dem zweiten Skalenanschlag fixiert. Es folgt dann die ballistische Ausmessung des Plattenkondensators und der eingestellten Kapazitätsdifferenz am Drehkondensator. Das Verhältnis der beiden Galvanometerausschläge gibt den Wert ε—1 an.

Auch die Hochfrequenzmessung macht keinerlei besondere Schwierigkeiten. Die Einstellung der Kapazitätsdifferenz am Drehkondensator und die Ausmessung der Kondensatoren geht ganz genau wie bei der eben besprochenen Brückenschaltung vor sich.

Resultate.

Gemessen wurden zwei Sorten Benzol, Benzol pro analysi und Benzol thiophenfrei, beide von Schering-Kahlbaum und zwar zunächst in der Brücke mit Niederfrequenz. Es zeigte sich, daß das unmittelbar aus der Originalflasche entnommene Benzol noch nicht ganz wasserfrei ist. So ergab z. B. Benzol thiophenfrei unmittelbar aus der Flasche entnommen, den D.K.-Wert 2.298 bei 18° C (Es werden hier alle angegebenen D.K.-Werte, um übersichtliche Vergleiche zu haben, mit dem weiter unten angegebenen Wert für den Temperaturkoeffizienten auf 18° C umgerechnet).

In das Benzol wurde hierauf Natrium gegeben und das Ganze vier Wochen stehen gelassen. Der nun gemessene D.K.-Wert war 2.283. Eine gleicherweise behandelte Probe der zweiten zur Verfügung stehenden Sorte Benzol pro analysi ergab ebenfalls den Wert 2.283. Das Benzol wurde hierauf mit Hilfe des schon erwähnten Destillationsapparates über Natrium direkt in die Vorratsflasche destilliert und sofort gemessen. Der D.K.-Wert wurde wiederum zu $\varepsilon = 2.283$ ermittelt. Die Destillation hatte mithin keine Änderung des D.K.-Wertes gebracht.

Ein Versuchsprotokoll für eine Messung hatte folgendes Aussehen:

Datum: 4. III. 1936.

Gemessene Substanz: Benzol pro analysi, bereits seit einigen Wochen über Na stehend, destilliert.

Brückenschaltung, Tonfrequenz.

Einstellung der Anschläge am Drehkondensator: 58.5°—175.5°.

Temperatur der Substanz im Plattenkondensatortrog: 18.5°.

Ballistische Ausmessung: Ladespannung E etwa 300 Volt.
Kompensationswiderstand R_2=207.9 Ω

Galvanometerausschläge:

a) Drehkondensator:

Ausschlag links	Nullpunkt	Ausschlag rechts			
92.8	504.0		411.2		
	503.7	916.9	413.2		
93.1	504.8		411.7		
	503.3	916.5	413.2	Mittelwert:	412.3
92.9	504.3		411.4	Korrektion	
	503.4	916.7	413.3	auf Bogen:	—3.6
92.9	504.2		411.3		408.7
	503.4	916.7	413.3		
92.8	504.2		411.4		
	503.4	916.7	413.3		

b) Plattenkondensator:

Ausschlag links	Nullpunkt	Ausschlag rechts			
	504.4	828.8	320.4		
	504.6	824.9	320.3		
	504.6	825.0	320.4	Mittelwert	320.5
	504.6	825.0	320.4	Korrektion	
	504.6	825.0	320.4	auf Bogen	—1.7
183.7	504.5		320.8		318.8
183.3	504.0		320.7		
183.2	503.8		320.6		
183.2	503.8		320.6		
183.2	503.7		320.5		

$$\varepsilon = \frac{408.7}{318.8} + 1 = 2.2820 \text{ für } 18.5^\circ \text{ C.}$$

$\varepsilon_{18^\circ} = 2.2829$ für 18.0° C.

Tabelle der gemessenen Werte für Benzol.

Substanz: Benzol pro analysi, bereits seit Wochen über Na stehend, destilliert.

Messung Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8
Datum		9. I. 36	17. I. 36	20. I. 36	27 I 36	10 II 36	10. II. 36	17. II. 36	4. III. 36
Temperatur der Substanz im Plattenkondensatortrog: t_0 C		18.3	18.1	18.5	17.0	18.2	18.4	18.1	18.5
Einstellung der Anschläge am Drehkondensator		50.2-175.0	49.9-175.0	57.3-175.1	57.6-175.5	57.1-175.1	58.0-175.3	58.0-175.4	58.5-175.5
Ballistische Ausmessung	Ladespannung E ≃ Volt	280	280	280	280	280	280	300	300
	Kompensations Wid. R_2	221.3	228.0	226.4	229.5	229.0	231.4	209.4	207.9
Galvanometer-ausschläge	Drehkondensator (Mittelwert, auf Bogen Korr.)	389.4	382.5	374.7	371.5	372.7	367.9	405.6	408.7
	Plattenkondensator (Mittelwert, auf Bogen Korr.)	296.4	291.0	292.1	289.0	290.4	287.0	316.2	318.8
ε für t^0 C.		2.3137	2.4146	2.2829	2.2856	2.2836	2.2820	2 2828	2.2820
ε für 18^0 C.		2 2833	2.2838	2.2838	2.2838	2.2840	2.2827	2.2830	2.2829

Zu Messung Nr. 1 und 2 ist zu bemerken, daß sie mit der als fehlerhaft erkannten Schaltung der Isolierstücke ausgeführt wurden; der gefundene Fehlbetrag von 0.031 ist deshalb von den erhaltenen Resultaten abgezogen worden.

Eine Zusammenstellung der gemessenen Werte für Benzol ergibt folgende Tabelle:

Nr.	Messung am:	ε	bei t° C	ε 18.0°
1.	9. I. 1936	2.2827	18.3	2.2833
2.	17. I. 1936	2.2836	18.1	2.2838
3.	20. I. 1936	2.2829	18.5	2.2838
4.	27. I. 1936	2.2856	17.0	2.2838
5.	10. II. 1936	2.2836	18.2	2.2840
6.	10. II. 1936	2.2820	18.4	2.2827
7.	17. II. 1936	2.2828	18.1	2.2830
8.	4. III.1936	2.2820	18.5	2.2829

Mittelwert: $\varepsilon = 2.2834$ für 18.0° C.

Erst in der 4. Stelle hinter dem Komma streuen die Werte in nicht mehr zu kontrollierender Weise. Die 3. Dezimalstelle, die immer sicher zu erreichen war, stellte die Grenze der Leistungsfähigkeit der Meßanordnung dar; es wurde deshalb auch darauf verzichtet, noch mehr Stellen anzugeben.

Die hauptsächliche Verunreinigung des Benzols stellt also das Wasser dar, das infolge seines hohen D.K.-Wertes sehr stark in die Messungen eingeht. Um einmal zu sehen, wieviel der Wassergehalt des Benzols ausmachen kann, wurde eine Probe, die zuvor den Wert 2.283 ergab, mit einigen cm^3 destilliertem Wasser versetzt, einige Stunden geschüttelt, einen Tag stehen lassen und hierauf gemessen. Es ergab sich ein D.K.-Wert von 2.317, d. h. um 1.5% mehr als der Normalwert. Diese Probe wurde hierauf wieder mit Natrium getrocknet. Nach einer Woche ergab sich ein Wert von $\varepsilon = 2.284$, nach 3 Wochen war der Wert 2.283 wieder erreicht.

Das Resultat der Versuche lautet also: Für Verwendung des Benzols zu Eichzwecken genügt es, das Benzol von Schering-Kahlbaum mit Natrium etwa 3—4 Wochen zu trocknen, um einen einwandfreien, sicheren Wert der D.K. von 2.283 für 18° C zu erreichen.

Eine weiter vorgenommene Untersuchung über den Temperaturkoeffizienten ergab für den Bereich +10° bis +18° den Wert 0.0018.

Weiter wurden, um für die Hochfrequenzmessungen den Fehlbetrag zu ermitteln, den die dort nicht mögliche, richtige Schaltung gegenüber der als fehlerhaft erkannten Schaltung der me-

tallischen Zwischenstücke der Isolierung aufweist, einige Brükkenmessungen mit dieser fehlerhaften Schaltung durchgeführt. Es wurden also die Zwischenstücke des Plattenkondensators mit Punkt A der Meßbrücke verbunden. Mehrere Messungen ergaben übereinstimmend den scheinbaren D.K.-Wert von 2.314, sodaß also der D.K.-Wert der Hochfrequenzmessungen um 2.314 —2.283 = 0.031 zu groß sich ergeben muß. Dieser Betrag muß also von den erhaltenen Werten abgezogen werden.

Die Hochfrequenzmessungen wurden mit denselben beiden Benzolsorten durchgeführt. In der Vorratsflasche befand sich dauernd eine große Menge Natriumdraht, sodaß das Benzol sicher wasserfrei war. Gemessen wurde bei:

100.00 K.Hz. = 2.330
305.95 „ = 2.335
1008.78 „ = 2.368

Nach Abzug des oben angegebenen Fehlbetrages ergibt sich:

Tonfrequenz: ε = 2.283
100.00 K.Hz.: ε = 2.299
305.95 „ : ε = 2.304
1008.78 „ : ε = 2.337.

Es wurde also ein langsames Steigen des D.K.-Wertes mit zunehmender Frequenz festgestellt.

Nun noch etwas über die Fehlerquellen, bezw. über die Genauigkeit der Methode. Bei den schon angeführten Versuchen, die das System Plattenkondensator + parallel geschalteten Drehkondensator betreffen, wurde durch die Messungen mit einer parallel geschalteten Kapazität bezw. durch die Messungen mit einem festen Ersatzkondensator für den Plattenkondensator und die Benzolfüllung schon gezeigt, daß sich eine Genauigkeit von 1—2‰ erreichen läßt. Auch die anderen in die Werte eingehenden Größen, wie die Ladespannung und die Zuverlässigkeit der Galvanometerausschläge selbst, besitzen eine Konstanz, die diese Genauigkeit ohne weiteres erwarten läßt. Bei den Galvanometerausschlägen wurden ja immer mindestens 10 Werte gemessen und zwar nach beiden Seiten und daraus das Mittel genommen. Die Galvanometerausschläge waren einige hundert Millimeter groß und die einzelnen Werte schwankten höchstens um einige Zehntel Millimeter. Wenn man noch die erhöhte Sicherheit durch die Mittelwertbildung berücksichtigt, so sind sie sicher bis auf Bruchteile eines Promille genau. Es besteht deshalb kein Grund,

auch für die gemessenen D.K.-Werte nicht diese Genauigkeit anzunehmen.

Die Werte für die D.K., die in der Literatur zu finden sind und die in der Tabelle von Landolt-Börnstein gesammelt wurden, streuen zum Teil sehr stark. Sehr zuverlässig erscheint der Wert von Hartshorn und Oliver[5]. Diese finden für 15° C 2.2915. Auf 18° umgerechnet ergibt dies 2.286. Dieser Wert ist aber auf das Vakuum bezogen und somit mit dem D.K.-Wert der Luft $\varepsilon = 1.00065$ multipliziert worden. Auf Luft bezogen, würde sich somit 2.2845 ergeben, ein Wert, der um 0.6‰ von dem von mir gemessenen abweicht.

Auch Präzisionsmessungen für Hochfrequenz sind noch wenige zu finden. R. W. Lunt und M. A. G. Rau[6] geben bei:

1.14	K.Hz.	= 2.28
11.5	„	= 2.29
42.7	„	= 2.29
123	„	= 2.29
461	„	= 2.28
903	„	= 2.28

und als Mittelwert aus diesen Messungen

$$\varepsilon = 2.285 \text{ bei } 25° \text{ C an.}$$

W. R. Pyle[7] fand bei 85.8 K.Hz. einen Wert von 2.279 bei 22.9° C, das entspricht einem $\varepsilon = 2.288$ bei 18° C.

Die Werte für den Temperaturkoeffizienten liegen in der Tabelle von Landolt-Börnstein alle zwischen 0.0015 und 0.0020. Die von mir beobachtete Zunahme der D.K. mit steigender Frequenz ist zwar klein (+ 2% bei 1000 K.Hz.), liegt aber außerhalb der abgeschätzten Versuchsfehler (vergl. S. 19 und S. 24).

Bestimmung der D.K. von Aceton.

Um auch für Messungen im Gebiet höherer D.K.-Werte eine Flüssigkeit, die zu Eichzwecken geeignet ist, zu besitzen, wurde noch Aceton untersucht. Leider verbietet die vielfach größere Leitfähigkeit des Acetons die Verwendung der für die Benzolmessung benutzten Anlagen. Bei der versuchten Verwendung

[5] Hartshorn u. Oliver. Proc. Roy. Soc. (A) 123, 664, 1929.
[6] R. W. Lunt u. M. A. G. Rau. Proc. Roy. Soc. (A) 126, 213—230, 1930.
[7] W. R. Pyle. Phys. Rev. (2) 38, 1057—1070, 1931.

im Hochfrequenzresonanzkreis war die Dämpfung so stark, daß die Resonanzkurve nicht mit der für eine Präzisionsmessung notwendigen Genauigkeit festgelegt werden konnte. Man müßte schon mit bedeutend größeren Energien arbeiten oder den Meßkondensator in den Senderschwingungskreis selbst einschalten. Dann besteht jedoch wieder die Gefahr, daß sich das Aceton durch die Energieaufnahme während der Messungen sehr stark erwärmt und so bedeutende Fehler möglich sind. Auch die Tonfrequenzmeßbrücke in der Ausführung für die Benzolmessung ist nicht ohne weiteres zu verwenden. Der Widerstand des Plattenkondensators mit der Acetonfüllung betrug nur einige Tausend Ohm; die rein kapazitiven Zweige der Brücke würden so für die verwendete Tonfrequenz einen vielmals so großen Widerstand darstellen als der Zweig mit dem Meßkondensator.

Abb. 9 zeigt eine Brückenanordnung, die sich nach vielen Versuchen bewährt hat. Zweig 3 der Brücke stellt wieder den Meßkreis dar mit dem Plattenkondensator + parallel geschaltetem Drehkondensator und dem Widerstand w_3. Der Plattenkondensator wurde für die Acetonmessung mit dem dickeren Quarzisolationsstückchen versehen, sodaß seine Maximalkapazität nur 25—30 cm betrug. Die beiden Einzelkondensatoren des Drehkondensators wurden parallel geschaltet verwendet. Es lassen sich so D.K.-Werte bis etwa 25 messen. Der Kondensator c_1 war ein veränderlicher Kondensator, der etwa auf den Wert Drehkondensator + Plattenkondensator, also auf etwa 800 cm eingestellt wurde. Die Widerstände w_1 und w_2 waren 2 Radiowiderstände von je 10 000 Ω, 1 Watt belastbar. Die Kapazitäts- und Selbstinduktionsfreiheit dieser Widerstände reicht für den vorliegenden Zweck vollkommen aus. Viel Mühe machte die Wahl der beiden regelbaren Widerstände w_3 und w_4. Nach verschiedenen Mißerfolgen mit Flüssigkeits- und Drahtwiderständen haben sich die Schichtpotentiometer von Siemens, wie sie für Radiozwecke benutzt wurden, gut bewährt. W_4 hatte einen Maximalwert von 10 000 Ω, w_3 einen solchen von 25 000 Ω. Es zeigte sich, daß die Einstellung von w_3 bei den Messungen viel zu grob war, es wurde deshalb in Serie damit ein kleiner Widerstand (etwa 30 Ω) geschaltet. Er war aus einem, um eine Hartgummischeibe von 6 cm Durchmesser gelegten und mit einer Schleiffeder abgegriffenen, 0,05 mm dicken Manganindraht gefertigt. Der Abgleich der Kapazitätszunahme und der Widerstandsverminderung durch die Acetonfüllung wurde nur wiederum im Zweig 3 der Brücke vorgenommen. W_4 war auf einen etwas klei-

neren Wert als der Plattenkondensator mit Acetonfüllung hatte, eingestellt. Das war etwa 4000 Ω. Bei der Lufteinstellung war dann w_3 ebenfalls 4000 Ω. Wurde nun der Kondensator mit Aceton gefüllt, so mußte w_3 soweit vergrößert werden, daß der Gesamtwiderstand im Zweig 3 wieder den Wert 4000 Ω erreichte. Der Kapazitätszuwachs wurde am Drehkondensator ausgeglichen.

Die Tonfrequenzspannung lieferte diesmal ein Schwebungssummer mit einem 3fach Verstärker. Durch ein Potentiometer konnte die an der Brücke angelegte Spannung genau eingestellt werden.

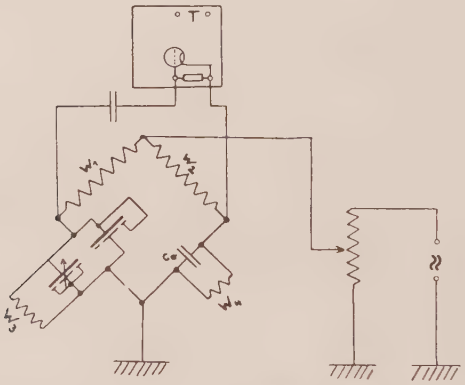

Abb. 9.

Zur Nulleinstellung war an die Brücke über einen Kondensator von 20 000 cm ein aus Batterien betriebener 2 Röhrenverstärker mit Telefon angeschaltet. Der Verstärker war mit seinen Batterien isoliert aufgestellt. Um Körperkapazität zu vermeiden, war der Telefonhörer starr am Tisch befestigt; abgehört wurde durch einen etwa ½ m langen Gummischlauch.

Die Isolationszwischenstücke am Plattenkondensator wurden diesmal mit den beiden Außenplatten verbunden. Ihre Kapazität gegen die Mittelplatte könnte also beim Abgleich Fehler verursachen. Da diese Kraftlinien aber ganz in dem festen Isoliermaterial (Quarz) liegen und somit bei der Acetonfüllung keine Erhöhung der Kapazität eintreten kann, ist ein Fehler nicht zu befürchten.

Um die Meßbrücke zu prüfen, wurden wieder Versuche gemacht mit einem festen Ersatzkondensator für die Kapazitätszunahme durch die Acetonfüllung und einem parallel geschalteten Widerstand als Ersatz für die Leitfähigkeit des Acetons. Gemessen wurde mit den Frequenzen 1000, 2000, 4000, 8000 Hertz. Der Widerstand wurde von 3000—6000 Ω geändert. Die am Drehkondensator eingestellten und dann ballistisch ausgemessenen Werte streuten innerhalb $3^0/_{00}$ vom Gesamtwert.

Zur ballistischen Ausmessung wurde eine Ladespannung von 100 Volt benutzt und der Widerstand R_1 an der Mittelanzapfung angeschlossen. R_2 ergab sich dann etwa zu 350 Ω.

Das Trockengefäß an der Vorratsflasche wurde mit Chlorkalzium gefüllt, da Phosphorpentoxyd die Acetondämpfe zersetzte.

Resultate.

Zu den Messungen benutzt wurde Aceton von Merk pro analysi.

Aus der Originalflasche direkt in die Vorratsflasche gefüllt ergaben sich folgende Werte:

Für 1000 Hz $\varepsilon = 22.40$
2000 „ $\varepsilon = 22.28$
4000 „ $\varepsilon = 22.28$
8000 „ $\varepsilon = 22.26$,
alle Werte für 17.9° C.

Das Aceton wurde hierauf mit entwässertem Kupfersulfat getrocknet, mit dem Destillierapparat in die Vorratsflasche destilliert und sofort gemessen. Die gefundenen Werte waren:

Für 1000 Hz $\varepsilon = 22.23$
2000 „ $\varepsilon = 22.18$
4000 „ $\varepsilon = 22.10$
8000 „ $\varepsilon = 22.09$ bei 17.1° C.

Als Mittelwert für die D.K. von Aceton kann also gelten:

$\varepsilon = 22.15$ für 17.1° C.

Durch die gegenüber dem Benzol wegen der großen Leitfähigkeit des Acetons erhöhten Schwierigkeiten der Messung kann dieser Wert nicht die gleiche Genauigkeit wie der Benzolwert be-

anspruchen. Außerdem sind bei der ballistischen Ausmessung des Plattenkondensators die Galvanometerausschläge schon recht klein, sodaß ein kleiner Fehler hierbei bei der Ablesung schon sehr stark in das Resultat eingehen kann. Auf mindestens 1% dürfte der Wert aber sicher sein.

Zusammenfassung.

Es wurde die D.K. des zu Eichzwecken häufig verwendeten Benzols und Acetons mit möglichster Genauigkeit bestimmt. Beim Benzol wurde ein langsames Ansteigen des D.K.-Wertes mit der Frequenz beobachtet.

Benzol:	2.283	für 18° auf Luft bezogen.	Tonfrequenz
	2.299		100 K.Hz.
	2.304		300 K.Hz.
	2.337		1000 K.Hz.
Aceton:	22.23	für 17.1°	1 K.Hz.
	22.18		2 K.Hz.
	22.10		4 K.Hz.
	22.09		8 K.Hz.

Bei Hochfrequenz war eine Präzisionsmessung der D.K. des Acetons nicht möglich, ohne daß eine wesentliche Abweichung von dem Niederfrequenzwert hätte beobachtet werden können.

Diese Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Würzburg ausgeführt. Herrn Professor Dr. F. Harms danke ich herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit, für sein stets förderndes Interesse und für die jederzeit bereitwillige Überlassung der Institutshilfsmittel.

Lebenslauf.

Am 14. Mai 1907 wurde ich, Wilhelm Franz, in Würzburg als Sohn des Buchbindermeisters und Papierwarenhändlers Paul Franz und seiner Ehefrau Justine, geboren. Von 1913 bis 1917 besuchte ich die Volksschule und von 1917 bis 1926 die Oberrealschule in Würzburg. Im März 1926 erwarb ich das Reifezeugnis. Zur Vorbereitung auf das technische Studium praktizierte ich anschließend 6 Monate bei der Schnellpressenfabrik Koenig und Bauer A.-G. in Würzburg. Im November 1926 wurde ich von der Technischen Hochschule München als Studierender aufgenommen. Im März 1931 legte ich dort die Diplomhauptprüfung für Elektroingenieure mit Erfolg ab und erwarb damit den Titel Diplom-Ingenieur. Von 1932 bis Juli 1936 arbeitete ich im Physikalischen Institut der Universität Würzburg an meiner Doktorarbeit. Seit 1. August 1936 bin ich bei der Nachrichtenmittel-Versuchsanstalt der Reichskriegsmarine in Kiel tätig.